

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 26 日現在

機関番号：32641

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887033

研究課題名(和文)原子の高空間分解制御および近接場技術の駆使による中性原子ナノ格子系の実現

研究課題名(英文)Construction of nano-lattice system of neutral atoms via precise spatial control of atoms and near-field techniques

研究代表者

柴田 康介 (Kosuke, Shibata)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：90735440

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノスケールの構造体付近の近接場を利用し、極低温原子をナノメートルスケール間隔で配置したナノ格子の実現を目指した。まず、構造体に平面波が入射した際の電磁場分布をFDTD法により計算した。特に、20 nm以下の構造について大きな電場勾配が発生し、高次の原子-光相互作用が無視できなくなることを見出した。また、冷却原子集団を高強度の赤外レーザーによる光トラップ中に捕獲したのち、高精度ステージにより光トラップ用ビームの焦点位置を移動することで、原子集団をガラスセル表面付近に移動することに成功した。この技術を用いると、近接場が発生する構造体のごく近傍に原子を準備することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research was to construct a nano-lattice in which ultracold atoms are located with the separation of nanometers using a near-field light around a nano-scale structure. First, we calculated the electromagnetic field distribution around a structure illuminated by a plane wave via FDTD method. In particular, we found that a large electric field gradient emerges for the structure with the size less than 20 nm and higher order atom-light interaction can not be neglected. Second, we successfully transferred cold atoms trapped in a near-infrared laser to the region close to a glass cell surface by moving the focus position of the trap beam with a high-precision stage. This technique allows us to prepare cold atoms in the very vicinity of the structure where an near-field exists.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：冷却原子 近接場 光格子

1. 研究開始当初の背景

近年、極低温中性原子気体を用い、多彩な量子現象が制御性よく実現されてきた。特に、いわゆる“光格子”(空間的に周期的な光ポテンシャル)中の極低温原子は、凝縮系物理との対応ならびに原子を用いた量子情報処理への応用の観点から注目を集め、盛んに研究されている。特に、最近では、サブ μm スケールの光格子中の個々の原子の観測・制御も実現するに至っている。

2. 研究の目的

本研究では、通常の光格子系における格子間隔の下限(光の波長程度に制約される)を超えた“ナノ格子系”を実現することを目指した。

ナノ格子系の特長に、大きな原子間長距離相互作用が生じることがある。原子間の長距離相互作用は、距離のべき乗に反比例するから、格子のスケールダウンにより、極めて大きな相互作用を導入することが可能である。この特性を生かし、本研究では、長距離相互作用する格子系の振る舞いの体系的解明を目標とした。

3. 研究の方法

本研究では、微細加工された物体近傍に発生する近接場と冷却原子の高空間分解制御技術とを高度に組み合わせることにより、中性原子のナノ格子系を実現することを目指した。

ナノ格子の実現にあたっては、強い近接場が存在する物体のごく近傍(典型的に光の波長程度)に極低温原子を準備することが必要不可欠である。しかしながら、原子の冷却に通常用いられるレーザー冷却技術を用いて、このような物体近傍に冷却原子を直接的に作り出すことはできない。

そこで、本研究では、真空セルの中心に生成した冷却原子を、いわゆる光ピンセット技術によって物質近傍に移動することを計画した。すなわち、集光した高強度レーザーによるポテンシャル(光トラップ)に原子を導入し、レーザーの焦点を移動することによって、原子を移送する。本研究では、物体と原子集団間の距離が極めて重要であるため、レーザーの焦点移動には高精度ステージを利用した。

また、最終的に、ナノ加工を表面に施した平面基板近傍に原子をトラップするのだが、基板に施すパターンの微妙な差異が近接場ポテンシャルに大きく影響する。そのため、発生する近接場の把握は極めて重要である。本研究では、実際の基盤製作に先立ち、FDTD(Finite-difference time-domain)法による電磁場解析を用い、精度よく近接場を計算することとした。

4. 研究成果

研究方法に示した通り、本研究では、

(1) ナノトラップポテンシャル発生用基板の設計

(2) 冷却原子の高精度移動技術の確立が要となる。以下、これらに関する成果の詳細を述べる。

(1)に関し、本研究では、FDTD法によって、ナノ構造体付近の電磁場分布を計算し、近接場の特徴的構造を見出した。

具体的には、あらゆる構造体に共通に含まれる基礎的な要素の1つである微小エッジ(nm ~数十 nm)に対し、平面波が入射した際の電磁場分布を計算した。このような状況では、エッジの周辺に、エッジと同等のサイズの局所場が発生することは、経験的(あるいは定性的)に知られているが、今回、局所場の構造スケールのエッジサイズ依存性を定量的に分析した。結果、エッジサイズが20 nm 程度(= $\lambda/20$ 程度。ここで λ は入射光の波長)以下である場合、近接場としての振る舞いが顕著になることを確認した。

ここで、興味深い点として、場の局所化にともなう電場勾配の極端な増加を見出した。10 nm 程度の構造体付近では、電場勾配が、通常の勾配(=波数 k)の、10000倍以上に達する。自由空間での主要な原子-光相互作用である電気双極子相互作用には、勾配依存性はないものの、高次の相互作用(例えば、電気四重極子相互作用)の大きさは、場の勾配につれて大きくなる。今回の知見は、ナノ構造体付近では、高次の原子-光相互作用を考える必要があることを如実に示すものである。

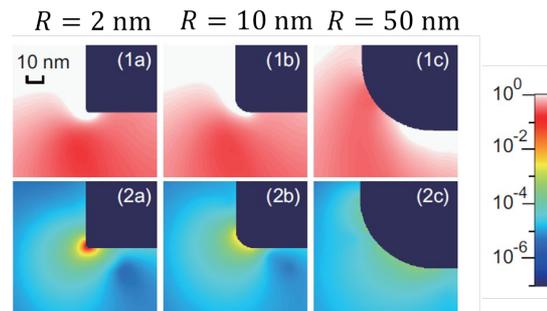


図1: 微小エッジ(半径 R)近傍の電場強度分布(上列)および電場勾配分布(下列)。エッジサイズが小さいときに、電場勾配の極端な増大が観測されることが分かる。

(2)に関し、まず、研究当初、赤外レーザー(波長1.06 μm)による光トラップ中に少数の原子を導入することには成功していたものの、保持時間が数十 ms と短かった。そこで、原子個数・保持時間を、原子を光トラップで移動できる程度(移動には少なくとも

数百msかかる)に十分な程度に改善した。そのうえで、高精度ステージにより光トラップ用ビームの焦点位置を移動することで、焦点位置にトラップされた原子を移動することに成功した。

この移動にあたっては、高精度な原子の位置の制御が必要不可欠である。なぜなら、強い近接場を得るには原子をなるべく物体に近づけたい一方で、原子を物体にあまり近づけてしまうと、原子が物体へと吸着するおそれがあるからである。そこで、平面基板に見立てたガラスセル表面付近への移動実験を行ない、原子移動の精度を評価した。

図2に実験結果を示す。セル表面に移動した原子集団の影を撮影した典型的な画像を図2aに示す。セル付近の原子に対し、セルを覗き込むようにプローブ光(共鳴光)を照射すると、通常の原子の影の像(実像)の他に、セル表面での光の反射により鏡像が生じる。図2aは、これを表しており、原子集団をセル付近に移動できていることが分かる。

さらに、実像と鏡像の間隔に基づき、原子集団からガラスセル表面までの距離を知ることができる。このことを利用し、ステージの移動距離(レンズ変位量) L と原子の移動量 dz の関係を調べ(図2b)、 $dz=1.2L$ と求めた。今回、用いたステージの移動精度は、 $1\mu\text{m}$ であるので、 μm 精度で原子位置を制御できることが分かる。原子集団のサイズ(\sim 数十 μm)を考えると、この精度は十分である。ただし、本技術において、光学系の改良を加えることで、光波長程度(数百nm)の位置分解能で原子を移動することも十分可能である。

原子がガラスセルのごく近傍にあること

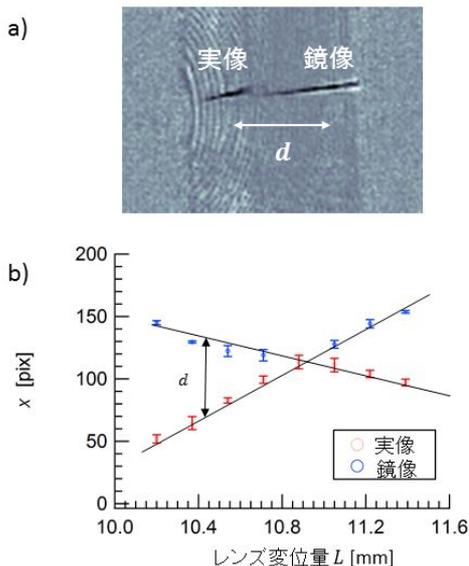


図2：原子の精密移動。a)ガラス付近の原子の吸収像。b)レンズ変位量と原子の実像、鏡像位置との関係。

をより確実に検証するため、パラメトリック共鳴を用いたトラップ周波数測定も行った。セル表面近傍では、トラップ光のセルでの反射により光格子(定在波)ができ、その結果、トラップ周波数が増大すると期待できる。実際、ステージの移動量を調整し、セルの近傍に原子を移動した場合、大きなトラップ周波数が確認された(図3参照)。つまり、本研究において、原子を物質近傍に移動する技術を確立できたことが分かる。

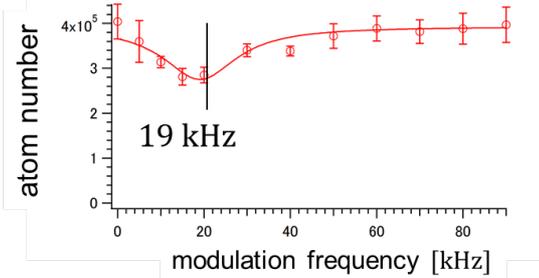


図3：セル近傍の原子に対するパラメトリック共鳴の観測。定在波の発現に伴う高周波数の共鳴が観測された。

さらに、原子をトラップから解放することによって、原子を物質のより近傍に準備することを試みた。光トラップにより原子をセル近傍に移動したあと、光トラップビームを切ることによって、原子は、熱的に拡散するはずであり、一部の原子をセル近傍に到達させられる。

実際、これを検証する実験を行った。低温原子がセル(室温)に衝突すると、急激に加熱され、衝突は原子ロスとして観測されると期待される。実験結果は、この簡単なモデルによる予測とよく一致した(図4参照)。この結果は、原子位置、温度、解放時間の制御によって、原子と近接場を相互させられる可能性を示している。

$z_0 = 50\mu\text{m}$, atom temperature $T = 74\mu\text{K}$

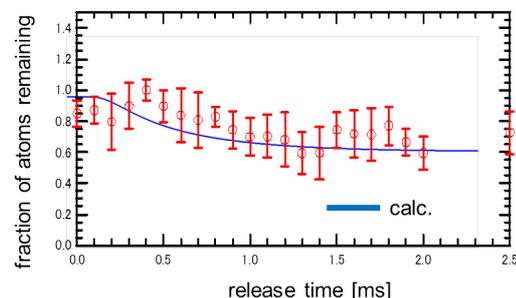


図4：セル近傍で解放した原子集団の個数の時間発展。実線(青)は、Maxwell分布と重力落下から予想される理論曲線。

また、(1)(2)に加え、以下の研究も進めた。

近共鳴光による原子トラップ

本研究の最終目的を達成するためには、ナノ加工を施した平面基板に裏面から近接場発生用ビームを照射し、近接場ポテンシャルを形成する必要がある。ここで、近接場発生用ビームとして、当初、十分に原子共鳴から離調を取った far off-resonant trap (FORT) を採用することを計画していた。しかし、FORT は、光自体によって生じる光散乱による原子の加熱が少ないという利点がある反面、ポテンシャルを形成するのに強い光強度を要するという難点がある。強い光強度は、基板の熱によるゆがみ・損傷などを招くおそれがある。

この難点を克服する新たな試みとして、離調を大きくとらない近共鳴トラップ (near optical resonant trap; NORT) への冷却原子の導入を行った。わずか 100 mW の近共鳴光中に、 $3 \sim 4 \times 10^6$ 個の冷却原子を捕獲することができた。これは、波長 $1.06 \mu\text{m}$, 10W の光を用いた FORT で捕獲できている原子数よりも2倍以上多く、十分大きなポテンシャルが低強度光により実現されていることが分かる。

現状、近共鳴光特有の輻射圧によって、原子をトラップ中にとどめることが困難であることが最大の問題となっている (図5参照)。しかし、近接場では、大きな電場勾配により、トラップ力 (= 双極子力 電場勾配) が輻射圧を上回るため、この問題は回避できると考えられる。今回の研究を通し、近共鳴トラップの利用により、扱いやすい低強度光によるナノ格子を実現できる見込みがたつた。

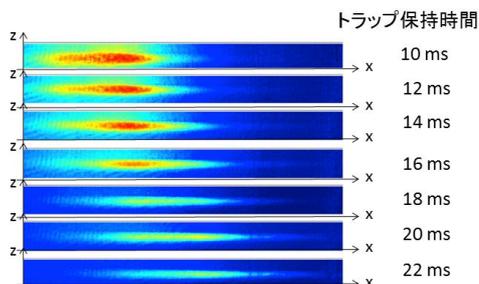


図5 : 近共鳴トラップ中の原子集団。赤部分が原子密度高く、青部分が原子密度低い。各画像は、トラップ中での原子の保持時間が異なる (保持時間に関しては図中参照)。

以上をまとめると、本研究期間内に、
・ナノ格子ポテンシャルの形成に向けた電磁場解析手法の開発

・近接場の特徴的構造の発見
・光ピンセットによる冷却原子移動技術の確立

・物体近傍への冷却原子の輸送の実現
・近接場の形成に適した近共鳴光による原子トラップを実現した。

このように、本研究期間内に、ナノ格子の実現に向けた研究を進めることができた。研究当初の目標であるナノ格子の形成は、冷却原子装置の大幅な改善を必要とするため、予算・時間の関係上、本研究期間内での実現は見送らざるを得なかった。しかし、今回の研究をもとに、今後も研究を進展させ、挑戦的な目標であるナノ格子の実現を目指したいと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Shinya Kato, Kensuke Inaba, Seiji Sugawa, Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, Makoto Yamashita and Yoshiro Takahashi

“Laser spectroscopic probing of coexisting superfluid and insulating states of an atomic Bose–Hubbard system”

Nature Communications **7**, 11341 (2016).

[学会発表](計 0 件)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/j/tojo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田康介 (Kosuke Shibata)

中央大学 理工学部 助教

研究者番号 : 90735440

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者
なし